

## TP 2: Diodes

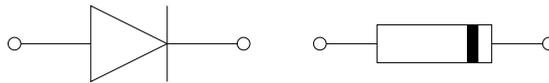
Sergio Gonzalez Sevilla\*, Antonio Miucci

Département de Physique Nucléaire et Corpusculaire (DPNC)  
Université de Genève (Faculté des Sciences, Section de Physique)

\*Sergio.Gonzalez@unige.ch

### Introduction

Les diodes sont des composants à deux bornes passifs non-linéaires, *i.e.* le courant n'est pas directement proportionnel à la tension appliquée. Une diode consiste en une jonction  $pn$ , dans laquelle le courant circule du matériel de type  $p$  (anode) vers celui de type  $n$  (cathode). Une diode idéale se comporte comme un interrupteur commandé par une tension, produisant un circuit ouvert dans une direction (l'anode est négative par rapport à la cathode, diode en polarisation inverse), et un court-circuit dans l'autre (l'anode est positive par rapport à la cathode, diode en polarisation directe).

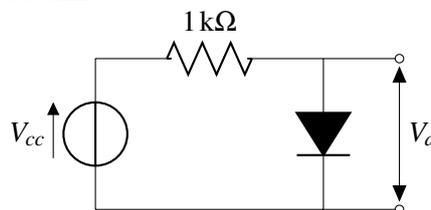


**FIGURE 1.** Symboles de la diode. La “flèche” (symbole de gauche) pointe dans la même direction que le sens conventionnel du courant. La direction de la diode est parfois indiquée par une bande dessinée sur une des extrémités du composant électronique (symbole de droite).

### 1. Caractéristique des diodes

#### 1.1 Diode au Silicium

1. Prenez une diode au Silicium (*e.g.* 1N914, 1N4148) et mesurez sa résistance à l'aide du multimètre, dans la direction normale et dans la direction inverse<sup>1</sup>. Expliquez vos observations.
2. Montez une résistance  $R = 1\text{ k}\Omega$  et une diode au Silicium en série avec une source de tension continue  $V_{cc}$  (figure 2). Notez les spécifications fournies par le fabricant quant au courant, tension et puissance maximaux que la diode peut soutenir.



**FIGURE 2.** Circuit à diode.

3. Faites la courbe caractéristique tension-courant (courant  $I_d$  de la diode en fonction de la tension  $V_d$ ) en variant  $V_{cc}$ . Commencez avec  $V_{cc} = 0$ , puis prenez au moins 10 points lorsque  $V_d$  se situe entre 0.25 et 0.7 V. **Prenez soin de ne pas excéder le courant maximal que peut accepter la diode !**

1. Si vous utilisez la fonction “Mesure de Résistance” du multimètre, assurez-vous que le voltage fourni est suffisant pour polariser votre diode.

- (a) En utilisant les lois de Kirchoff, exprimez la tension aux bornes de la résistance  $R$  et le courant  $I$  circulant dans le circuit en fonction de  $V_{cc}$  et  $V_d$ .
- (b) Déterminez la *tension thermique*  $V_T$ , donnée par :

$$V_T = \frac{k_B T}{q}$$

où  $k_B$  est la constante de Boltzmann,  $T$  la température dans le laboratoire et  $q$  la charge élémentaire.

- (c) Décrivez la forme de la courbe ( $V_d, I_d$ ) et comparez-là avec le modèle théorique (approximatif) de la diode, donné par l'équation de Shockley :

$$I_d = I_s \cdot (e^{\frac{V_d}{\eta V_T}} - 1)$$

$$\frac{dI_d}{dV_d} = \frac{I_s}{\eta \cdot V_T} \cdot e^{\frac{V_d}{\eta V_T}}$$

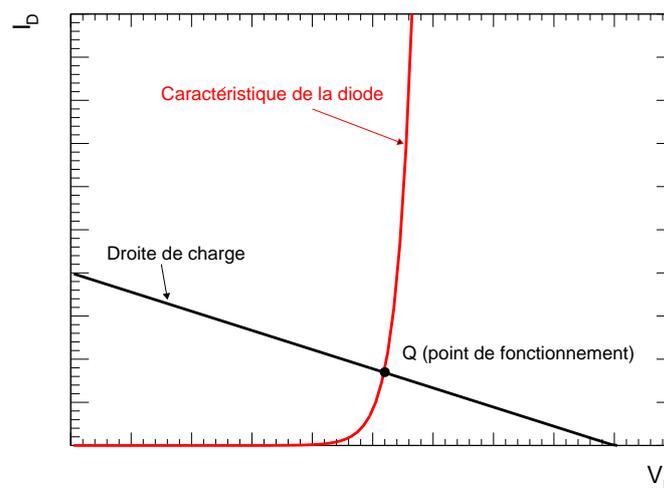
où  $\eta$  est la constante de la diode (“*ideality factor*” en anglais) et  $I_s$  le courant d'échelle (“*reverse bias saturation current*”).

- (d) Comment la courbe ( $V_d, I_d$ ) se compare-t-elle avec celle d'une résistance seule ?

## 1.2 Droite de charge

La droite de charge (“*load line*”) donne le point de fonctionnement d'un composant placé dans un circuit donné. Son utilité deviendra plus évidente avec les transistors, mais en attendant, les diodes permettent de bien illustrer le concept.

- Déterminez la droite de charge (figure 3) du circuit utilisé précédemment (figure 2). Pour ceci :
  - Ecrivez les lois de Kirchoff des noeuds et de maille du circuit.
  - Considérez les cas limites où la diode crée un circuit ouvert ( $I_d = 0$ ) et où la diode crée un court-circuit ( $V_d = 0$ ).
- Le **point de fonctionnement** (“*working point*”, ou “*quiescent point*” ou “*Q-point*”) de la diode correspond au point d'intersection entre la courbe de polarisation ( $V_d, I_d$ ) et la droite de charge du circuit (voir figure 3). Ce point de fonctionnement représente le courant que parcourt la résistance et la diode.



**FIGURE 3.** La droite de charge coupe la caractéristique de la diode au point de fonctionnement. L'exemple montre une diode en polarisation directe.

Pour deux tensions d'entrée différentes ( $V_{cc} = 2\text{ V}$  et  $V_{cc} = 4\text{ V}$ ) :

- (a) Déterminez graphiquement le point de fonctionnement de la diode.

- (b) Mesurez le courant  $I$  et comparez votre résultat au point de fonctionnement trouvé ci-dessus, en tenant compte des tolérances sur les divers composants.
- Produisez une autre droite de charge en changeant la valeur de  $R$ , en prenant soin de ne pas excéder le courant maximal que peut accepter la diode. Prenez des valeurs différentes de vos voisins. Prédisez le courant traversant la diode.
  - Montez ce nouveau circuit et comparez le courant mesuré avec celui prédit grâce à la courbe de charge, en tenant compte des tolérances sur les divers composants.
  - Mesurez la courbe  $(V_d, I_d)$  d'une diode au Germanium et d'une LED, et comparez les avec la droite de charge trouvée précédemment. Comparez vos observations sur les différents types de diode.

### 1.3 Diodes particulières

- Les diodes Zener sont conçues pour fonctionner en polarisation inverse, régime dans lequel un tout petit changement de tension peut causer un très grand changement de courant.

- (a) Montez une diode Zener en série avec une source de tension continue et une résistance, mais montez-la en sens inverse (voir figure 4). Mesurez sa courbe  $(V_d, I_d)$ , en polarisation directe et inverse.

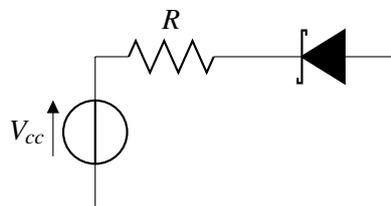


FIGURE 4. Circuit avec résistance et diode Zener en série.

- (b) Produisez la droite de charge pour une tension d'entrée  $V_{cc}$  telle que la diode soit en polarisation inverse et qu'un courant circule. Superposez la courbe  $(V_d, I_d)$  à la droite de charge et déterminez le point de fonctionnement. Comparez celui-ci au courant  $I$  mesuré. A quoi correspond la pente de la courbe  $(V_d, I_d)$  dans cette région ?
- Les diodes électroluminescentes ("Light Emitting Diodes" ou LEDs) sont actives lorsqu'elles sont placées dans le sens du courant (polarisation directe), qui contrôle l'intensité de la lumière émise. Ces diodes doivent être protégées d'un excès de courant en plaçant une résistance en série.

- (a) Choisissez une LED et prenez note du courant maximal  $I_m$  qu'elle peut soutenir. Grâce aux lois de Kirchoff, déterminez la valeur de la résistance  $R$  nécessaire pour limiter le courant afin de ne pas endommager la LED pour  $V_{cc} = 5$  V (voir figure 5a).
- (b) Ajoutez cette LED et la résistance  $R$  en série avec la diode Zener en polarisation inverse (figure 5b). Mesurez la courbe  $(V_d, I_d)$  pour la LED en variant  $V_{cc}$  (en commençant avec  $V_{cc} = 0$ ). Expliquez la valeur de la tension à laquelle la LED s'allume. Comparez ce résultat avec la courbe  $(V_d, I_d)$  mesurée précédemment.

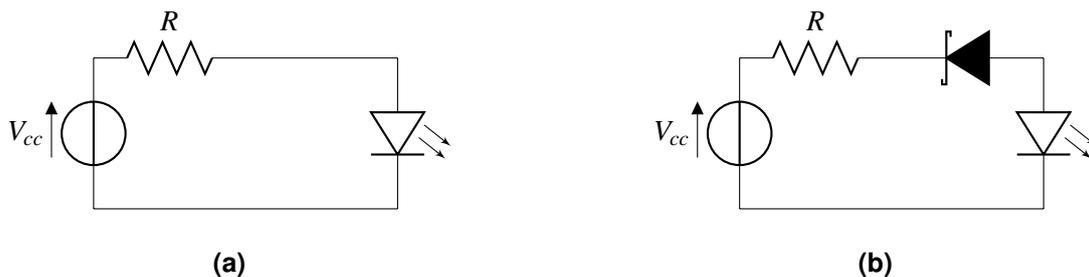


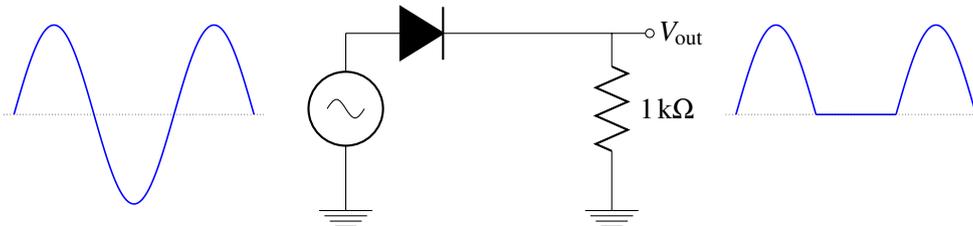
FIGURE 5. (a) Circuit avec LED et résistance. (b) Circuit avec LED, résistance et diode Zener.

## 2. Applications

### 2.1 Redressement simple alternance

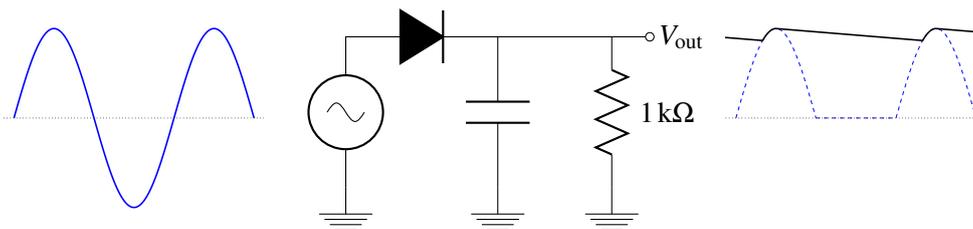
Une des applications principales des diodes consiste à transformer un signal alternatif, dans lequel le sens de circulation des électrons s'inverse à chaque demi-période, en un signal dans lequel les électrons circulent en sens unique.

- Montez le circuit de la figure 6. Produisez un signal d'entrée sinusoïdal avec le générateur d'onde, et observez le signal de sortie  $V_{out}$ . Expliquez.



**FIGURE 6.** Circuit redresseur à simple alternance : diode et résistance.

- Modifiez le circuit en ajoutant un condensateur de  $5 \mu\text{F}$  (figure 7). Observez le signal de sortie en choisissant la fréquence du signal d'entrée de façon à pouvoir observer l'ondoiement (comme montré à la figure 7), et expliquez pourquoi  $V_{out}^{max} < V_{in}$ .



**FIGURE 7.** Circuit redresseur à simple alternance : diode, résistance et condensateur.

- Déterminez :

- la période du signal d'entrée  $T$
- la période du signal de sortie  $T_2$
- le temps de montée de la crête du signal de sortie  $t_1$
- le temps de descente de la crête du signal de sortie  $t_2$

Expliquez les relations entre  $T$ ,  $T_2$ ,  $t_1$  et  $t_2$ . Pourquoi  $T_2 > T$  ?

- Notez la fréquence et l'amplitude  $V_{ripple}$  de l'ondoiement (*ripple*), et montrez que :

$$V_{ripple} = V_{out}^{max} - V_{out}^{min} = V_{out}^{max} \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t_2}{RC}\right) \right]$$

- Répétez la mesure avec des résistances de  $270 \Omega$  et  $10 \text{ k}\Omega$ , et montrez que :

$$V_{ripple} \sim \frac{V_{in} - 0.7}{f \cdot RC}$$

- Choisissez de nouvelles valeurs de  $f$ ,  $R$  et  $C$  de façon à amplifier l'ondoiement, et de façon à l'éliminer le mieux possible. Montrez que dans le dernier cas, il est préférable de choisir  $RC \gg t_2$  (où  $t_2 \sim T$ ).

### 2.2 Redressement double alternance

1. Montez le circuit de la figure 8 en utilisant le transformateur,  $R = 10\text{ k}\Omega$  et  $C = 1\ \mu\text{F}$ . En utilisant le générateur d'onde, produisez un signal d'entrée sinusoïdal avec amplitude 10 V et fréquence 1 kHz, et observez le signal de sortie  $V_{\text{out}}$ .

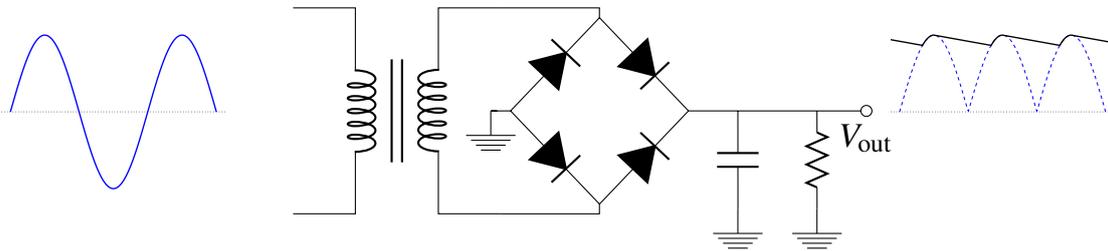


FIGURE 8. Circuit redresseur à double alternance.

2. L'expression pour la tension d'ondoiement est similaire à celle du redresseur demi-onde :

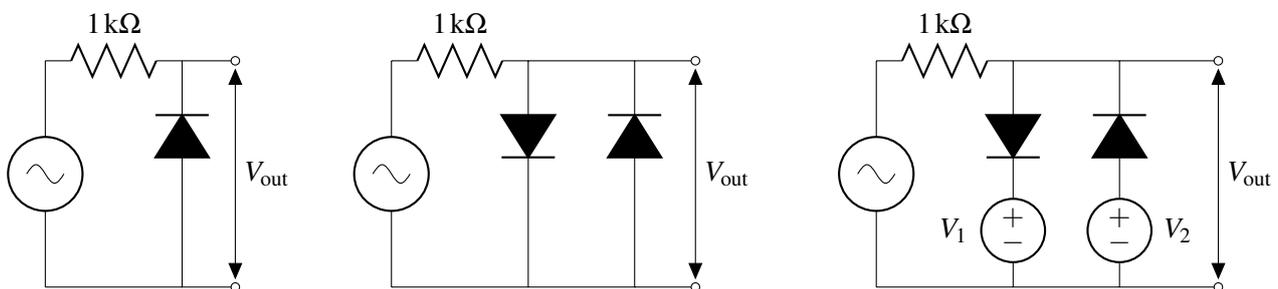
$$V_{\text{ripple}} \sim \frac{V_{\text{in}} - 0.7}{2f \cdot RC}$$

Expliquez d'où vient le facteur 2 au dénominateur.

3. Calculez  $V_{\text{ripple}}$  à l'aide de la formule et des valeurs données plus haut. Obtenez une deuxième valeur calculée pour une résistance  $R = 1\text{ k}\Omega$ .
4. Vérifiez vos valeurs théoriques à l'aide de votre montage. Expliquez vos résultats et établissez les conditions d'utilisation de l'expression théorique.

### 2.3 Circuits écrêteurs

1. Montez le circuit de la figure 9a. Appliquez une onde sinusoïdale en entrée, puis observez et expliquez le signal de sortie aux bornes de la diode.
  - (a) Sur le même circuit, montez la diode à l'envers ; observez et expliquez.
  - (b) Remplacez la diode par une diode Zener et expliquez ce que vous observez. Refaites l'exercice en montant la diode à l'envers.
2. Montez le circuit de la figure 9b. Observez et expliquez le signal de sortie.
3. Montez le circuit de la figure 9c. Observez et expliquez le signal de sortie.



(a) Résistance et diode.

(b) Deux diodes opposées.

(c)  $V_1 = 1.3\text{ V}$ ,  $V_2 = -2.3\text{ V}$ .

FIGURE 9. Circuits écrêteurs. Dans tous les cas, le signal sinusoïdal d'entrée a une amplitude de 5 V et une fréquence de 1 kHz.

### 3. Logique digitale

#### 3.1 Déclenchement

En physique expérimentale, en particulier à hautes énergies, des quantités phénoménales de données sont enregistrées. Pour cette raison, les données ne sont enregistrées que lorsque le détecteur (ou une partie du détecteur) est active. Le déclenchement (“*trigger*”) ne se fait que si le signal remplit des caractéristiques très précises, comme par exemple deux signaux espacés de moins de 2 ms dans deux sous-détecteurs adjacents.

En utilisant un condensateur, une diode et deux résistances, concevez un circuit fournissant un signal ponctuel (une impulsion électrique) positif lorsqu’un signal apparaît à l’entrée du circuit. Démontrez votre compréhension en utilisant un signal carré pour simuler l’arrivée d’un signal dans votre circuit.

#### 3.2 Portes logiques “ou” et “et”

1. Montez le circuit de la figure 10.
2. Fournissez une tension de +5 V uniquement à la borne A ( $V_A$ ), puis uniquement à la borne B ( $V_B$ ), puis aux deux bornes. Notez vos observations par rapport à la tension de sortie  $V_{out}$  (*i.e.*, aux bornes de la résistance).
3. Répétez l’exercice pour le deuxième circuit (figure 11), et expliquez leur fonctionnement comme porte logique “ou” ou “et”.

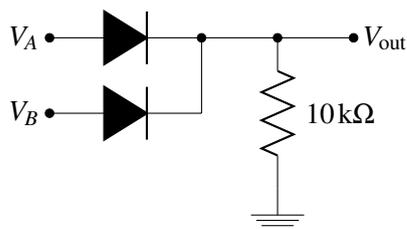


FIGURE 10. Porte logique “ou”.

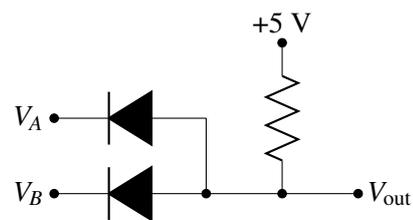


FIGURE 11. Porte logique “et”.